

폴리머 개질 아스팔트 콘크리트의 푸아송비에 관한 실험적 연구

Evaluation of Poisson's Ratio of Polymer-Modified Asphalt Concretes

김 광 우* · 권 승 준**
Kim, Kwang Woo · Kwon, Seung Zoon
도 영 수*** · 이 상 범***
Doh, Young Soo · Li, Xiang Fan

Abstract

This study was performed to examine Poisson's ratio of polymer-modified asphalt concrete due to temperature variation. Asphalt binder used in this study was an AC85-100, penetration grade of 85-100, and polymers for modifying asphalt were domestic LDPE(Low-density polyethylene) and SBS(Styrene-butadiene-styrene). Aggregate was a crushed gneiss which was most widely used in the middle part of Korea. Using these materials, asphalt mixture slab(340mm×240mm×80mm) with optimum asphalt content from mix design was made and cut into square pillar(80mm×80mm×160mm). Poisson's ratio was measured in various temperature(-15°C, -10°C, -5°C, 0°C, 5°C, 10°C and 20°C) under the load of one axis repeated compression mode. Poisson's ratio of normal asphalt mixture (AP) showed not only the highest in low temperatures but also higher than polymer modified asphalt mixtures in normal temperatures. This indicated that AP mixture was more susceptible to temperature effects. From regression analysis of experimental results, the difference of Poisson's ratio between normal and low temperature showed that polymer modified asphalt mixtures were lower than AP mixture except for SBS modified asphalt mixture.

I. 서 론

아스팔트 콘크리트의 푸아송비 (Poisson's ratio)는 아스팔트 포장의 깊이 에 따른 응력 및 변형률 해석에 필요하며 또한 재료의 강성 계산 및 저온

에서 아스팔트 혼합물의 파괴인성 (응력확대계수)을 평가하는데 필요한 중요 변수이다. 아스팔트 콘크리트의 푸아송비는 온도에 따라 크게 변화한다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 고온인 60°C에서는 그 값이 약 0.5 정도이고 빙점에 가까운 온도에서

* 강원대학교 농업공학부

** 삼척대학교 토목공학과

*** 강원대학교 대학원

키워드 : 아스팔트 결합재, 폴리머 개질 아스팔트, 푸아송비, 온도영향

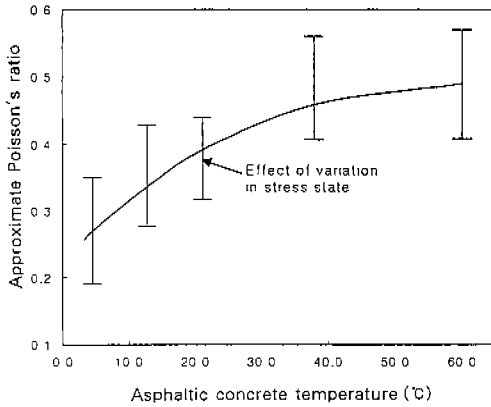


Fig. 1. Effect of asphalt concrete temperature on Poisson's ratio (Yodar et al, 1975)

는 0.25 정도가 되는 것으로 알려져 있다. 하지만 빙점 이하 저온에서의 푸아송비는 널리 알려져 있지 않고, 또한 Fig. 1에서 보는 바와 같이 아스팔트 콘크리트의 푸아송비는 같은 온도 하에서도 그 편차가 매우 큰데, 이는 아스팔트 혼합물이 가지는 재료의 다양성(variability) 때문이다.

본 연구는 결합재인 아스팔트를 개질하여 밀입도 혼합물을 제조하고 상온 이하에서 그 혼합물의 온도 변화에 따른 푸아송비를 규명하였다. 개질재료는 앞선 연구 (김광우 1996, 김광우 등 1996, 김광우 등 1997)를 통하여 4가지의 국산 폴리머 중 비교적 개질 효과가 우수한 두가지 폴리머를 선정하였다.

따라서 본 연구에서는 선정된 두가지 폴리머 (LDPE : Low-density polyethylene 및 SBS : Styrene-butadiene-styrene)를 사용한 개질 아스팔트로 제조한 아스팔트 콘크리트의 일축반복압축 하중하에서의 온도별 푸아송비를 실험적으로 규명하였다. 따라서 본 연구의 목적은 상온이하의 다양한 온도 하에서 폴리머 개질 아스팔트 밀입도 혼합물에 대한 푸아송비를 측정하고 일반 아스팔트 혼합물과의 차이를 비교 분석하여 개질 아스팔트 혼합물의 푸아송비에 관한 기초자료를 제시하는 것이다.

II. 재료 및 방법

1. 재 료

본 연구에 사용된 결합재는 우리 나라 중부지역에서 널리 사용되고 있는 AC 85~100 (AP-3, 침입도 등급 85~100) 아스팔트 시멘트이고, 품질 시험 결과는 Table 1과 같다.

아스팔트 콘크리트 혼합물의 특성은 결합재인 아스팔트 시멘트와 더불어 골재의 품질이나 입도에 크게 영향을 받는다. 특히 골재는 생산지 별로 그 조건이 다르기 때문에 사용 전에 각 지방 규정에 적합한지를 반드시 검토하여야 한다. 따라서 본 연구에서 사용된 골재는 강원 영서지방에서 생산되는 편마암 (Gneiss) 쇄석으로서, 골재의 물성은 Table 2와 같다. 또한 각 골재는 개질 결합재를 이용한 가열 혼합(Hot-mix) 아스팔트 콘크리트의 제조를 위해서 건설교통부제정 도로공사 표

Table 1. Physical properties of asphalt cement

Classification	AC 85~100	
	Spec.	Measured value
Penetration 25°C (0.1mm)	85~100	94
Absolute viscosity (60°C)	-	952
Ductility 25°C (cm)	>100	>150
R. B. softening point (°C)	-	44
Retained penetration after thin - film oven test (%)	>47	89.8
Ductility after thin-film oven test (cm)	>75	>150
Specific gravity	-	1.03

Table 2. Physical properties of aggregates

Classification	Apparent specific gravity	Abrasion (%)	Absorption (%)
Spec. limit	≥2.5	≤35%	≤3.0%
Gneiss	2.72	18.1	0.7

Table 3. Specification limits of Korea Highway Corporation for dense graded asphalt mixture and gradation of 19mm gneiss aggregate

Sieve size		25mm	19mm	13mm	#4	#8	#30	#50	#100	#200
Passing percent (%)	Spec.	100	95~100	75~90	45~65	35~50	18~30	10~21	6~16	4~8
	Gneiss	100	99.1	78.3	52.3	40.1	22.6	17.0	11.6	7.73

준시방서 (한국도로교통협회 1996)의 19mm 밀입도 규격에 적합하도록 조정하여 사용하였으며, 그 입도 분포는 Table 3과 같다.

본 연구에 사용된 폴리머는 LDPE(Low-density polyethylene)와 SBS(Styrene-butadiene-styrene)이며, 이 제품들은 국내에서 생산되어 구입이 가능한 분말 형태의 폴리머이다. 이중 LDPE는 50번 체에 거의 다 통과(통과량 99.5%)하는 비교적 고운 분말이고, SBS는 그 보다 입자가 훨씬 커 50번 체(통과량 약 1%)에 거의 다 남고 8번 체를 거의 다 통과(통과량 99.5%)하는 분말이다.

또한, 두 폴리머와 병행하여 카본 블랙 (Carbon black)을 사용하였는데, 이는 페타이어로부터 추출된 것으로 국내에서 생산되고 외형이 고운 분말이며 검은 색이다. 이것의 사용은 폴리머와의 결합에 의한 역학적 특성 상승 효과와는 별도로 자외선에 약한 폴리머의 보호를 통한 내구성 증진과 혼합물의 강성 향상에 도움이 되는 것으로 알려져 있기 때문이다.

본 연구에서는 문헌(김광우 등 1996, 1997, Lee, N. K. 등 1994)에서 제시하는 최적 값인 아스팔트 중량비 10%의 카본 블랙을 혼합물 제조시 골재와 함께 섞어 사용하였다. 카본 블랙의 사용은 사전 시험에서 LDPE의 경우 효과적이나 SBS의 경우는 인장강도는 물론 강성의 증진에도 효과적이지 못한 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서의 혼합물 중 각 폴리머의 혼합 비율은 아스팔트 함량의 중량비로 LDPE 6%+Carbon black 10%, LDPE 4%+SBS 3%, SBS 5%를 사용하였다. 각 혼합물의 용어 정의는 Table 4에 표시하였고, 폴리머에 대한 물리적 성질은 Table 5, 6과 같다.

Table 4. Definition of Mixtures

Abbreviation	Description
AP	Normal asphalt mixture without any polymer(control)
LC	Asphalt mixture with LDP 6% plus Carbon black 10%
LS	Asphalt mixture with LDPE 4% plus SBS 3%
S	Asphalt mixture with SBS 5%

Table 5. Physical properties of low density polyethylene

Material	Volatility (%)	Color	Tensile strength (kgf/cm ²)	Extendability (%)
LDPE	0.62	White	233	1,020

Table 6. Physical properties of SBS

Material	Solubility (%)	Density (g/cm ³)	Color	Foreign substance	Volatility (%)	Lime (%)
SBS	0.31	0.957	White	NIL	0.018	0.024

2. 실험 방법

아스팔트 콘크리트의 푸아송비 측정 방법은 여러 가지가 있다. 본 연구에서도 예비시험으로 마샬공시체를 사용한 간접인장모드 및 원주형 공시체를 사용한 일축압축 모드에서 반복하중을 가하여 측정을 시도하였으나 측정치에 편차가 너무 커 각주형 공시체에 반복하중을 가하는 방법을 사용

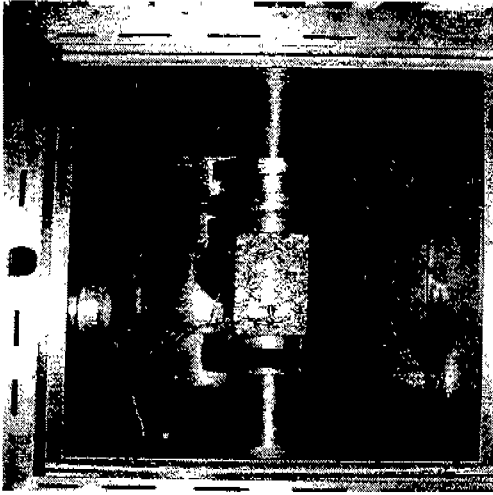


Photo 1. Poisson's ratio test instrumentation

하였다. 공시체는 80mm×80mm×160mm의 각주형이다. 이는 롤러 다짐기에 의하여 제조된 340mm×240mm×80mm의 슬래브 공시체를 제조하여 컷터기로 소정의 규격으로 절단하여 만들었다. Photo 1.에서 보는 바와 같이 공시체 각 면의 중앙에 4개의 스트레인 게이지를 대칭이 되게 수직, 수평으로 각각 2개씩 부착하고 각 온도별로 하중 재하에 따른 공시체의 변형률을 측정하였다. 이 시험에 사용된 스트레인 게이지는 콘크리트용으로 저항이 120.3±0.5Ω이며, 길이는 60mm이다.

측정 온도는 -15℃, -10℃, -5℃, 0℃, 5℃, 10℃, 20℃로 하여 저온 영역에서는 물론 상온에서의 푸아송비도 측정하였다. 공시체는 제조 후 필요한 스트레인 게이지를 부착하고 최저 온도인 -15℃에서 Environmental chamber에 4시간 동안 보관 후 같은 온도로 조절된 시험 챔버에 바로 이동시켜 시험을 수행하였다. 이렇게 공시체를 이동하는 동안 외기의 습기에 의해 스트레인 게이지 표면에 물이 생기는 것을 방지하기 위하여 얇은 비닐로 공시체를 느슨하게 포장하였다. 사용된 스트레인 게이지의 특성상 -20℃이하에서는 푸아송비의 측정이 불가능하였다. 푸아송비 측정 시험을 위해 이용된 장비는 Instron 8516 만능 재료시험기이며 시험기에 설치된 챔버의 온도는 액화질소를 사용

하여 조절하였다. 하중은 Halversine 반복하중으로 주기는 1Hz, 최대하중 2,000kg부터 200kg을 저온으로부터 상온에 걸쳐 다양하게 재하하였으며, 공시체의 초기 압밀에 의한 영향을 줄이기 위하여 300cycle의 재하 후 5회에 걸쳐 측정된 값으로부터 푸아송비를 계산하여 그 평균치를 구하였다. 공시체는 각 온도별로 2회 그리고 각 공시체별로 한번 측정후 위아래를 뒤집어 다시 측정한 총 4회 측정의 평균치를 전 온도에 걸쳐 회귀 분석하였다.

Fig. 2는 푸아송비 측정의 290 cycle과 300 cycle 사이에서 얻어진 공시체 수직 및 수평 변형률의 한 예를 보여주며, 사용된 공식은 다음과 같다.

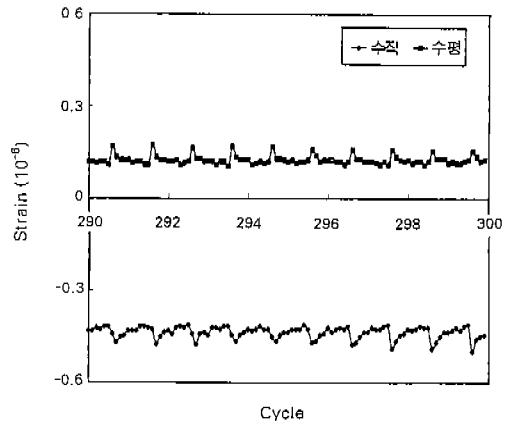


Fig. 2. Example of vertical and horizontal strain of specimen

$$\nu = -\frac{\epsilon_t}{\epsilon_l} \dots \dots \dots (1)$$

여기서, ϵ_t 와 ϵ_l 은 각각 수평 및 수직 변형률의 평균의 평균치이다.

Ⅲ. 결과 및 분석

각 혼합물별 푸아송비 측정 결과는 Table 7 및 Fig. 3~6과 같다. 실험 결과를 보면 일반아스팔트 혼합물의 경우는 -15℃의 LS를 제외하고 저온

Table 7. Results of Poisson's ratio test at various temperatures

Temp. (°C)	Variation	AP	LC	LS	S
-15	Max.	0.18	0.17	0.19	0.12
	Min.	0.17	0.17	0.18	0.11
-10	Max.	0.21	0.16	0.17	0.18
	Min.	0.16	0.13	0.16	0.14
-5	Max.	0.28	0.19	0.23	0.17
	Min.	0.22	0.18	0.21	0.14
0	Max.	0.34	0.31	0.27	0.32
	Min.	0.31	0.26	0.26	0.20
5	Max.	0.37	0.34	0.34	0.38
	Min.	0.33	0.30	0.24	0.33
10	Max.	0.38	0.35	0.35	0.38
	Min.	0.35	0.32	0.31	0.38
20	Max.	0.40	0.35	0.32	0.35
	Min.	0.38	0.32	0.28	0.32

(0°C 이하)에서 개질 아스팔트 혼합물에 비하여 다소 높은 값을 나타내었고, 영상 온도에서는 온도가 높아질수록 모든 혼합물이 높은 값을 나타냈다. LS와 LC 혼합물의 경우 저온 구간에서 상대적으로 높은 값을 보였으나 상온에서는 AP 혼합물과 S 혼합물에 비하여 상대적으로 낮은 값을 나타내 온도의 영향을 가장 받는 것으로 나타났다. S 혼합물의 경우도 실험치와 유사한 경향을 보였다. S 혼합물의 경우는 저온에서 가장 낮은 값을 나타내었고 상온에서 상대적으로 높은 값을 나타내었다. 고온과 저온 사이에 변화 폭이 뚜렷하게 나타나 감온성이 가장 큰 혼합물로 판단된다.

각 혼합물별 시험 결과를 가지고 회귀분석을 수행한 결과 모든 혼합물은 2차식으로 가장 적합하게 곡선 맞춤 (curve fitting)되었으며 결정계수 (r^2)도 모두 0.85 이상으로 상당히 높게 나타났다. 이는 푸아송비의 측정이 어려워 측정값에 편차가 크게 나타나는 아스팔트 콘크리트의 특성에 비하

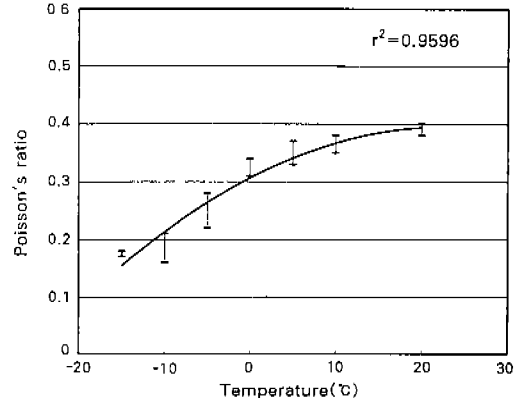


Fig. 3. Variation of Poisson's ratio by temperatures (AP mixture)

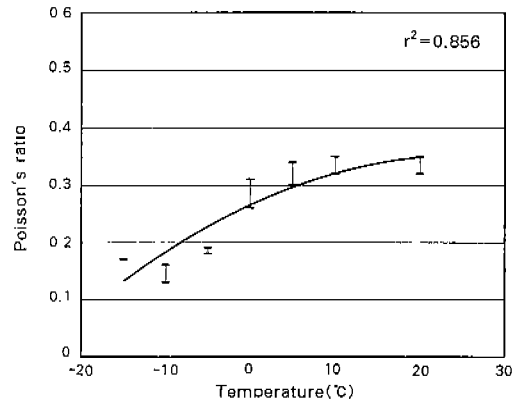


Fig. 4. Variation of Poisson's ratio by temperatures (LC mixture)

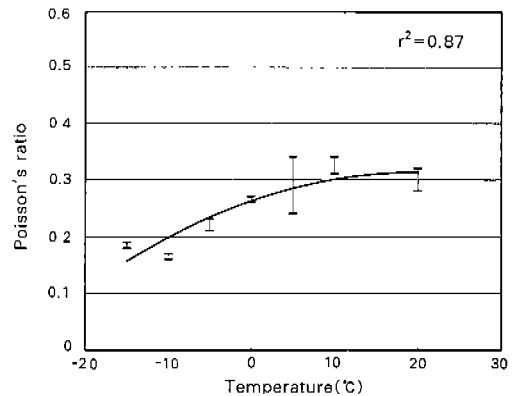


Fig. 5. Variation of Poisson's ratio by temperatures (LS mixture)

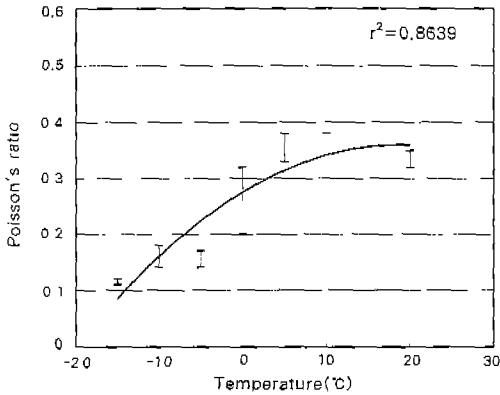


Fig. 6. Variation of Poisson's ratio by temperatures (S mixture)

면 매우 상관성이 높은 것으로 판단된다. 전반적인 경향은 Fig. 1의 곡선과 유사한 형태로 나타나 저온으로 갈수록 푸아송비가 급속히 낮아지는 경향을 나타냈다. 그러나 이중 LS 개질 혼합물의 곡선이 온도변화에 가장 완만하게 변화하는 것을 알 수 있었다.

Table 8은 각 혼합물별 온도 변화에 따른 푸아송비 추정 회귀식과 그 식으로부터 온도별 추정치이다. 회귀분석 식에 의한 푸아송비 추정치 변화는 Table 8에서 보는 바와 같이 일반 아스팔트 혼합물의 경우는 저온에서 가장 높은 값을 나타냈고 상온에서도 개질 아스팔트 혼합물에 비하여 높은 값을 보였다.

회귀분석에 의한 추정치를 보면 가장 저온인 -15°C에서 LS, AP, LC, S 순으로 푸아송비가 0.16~0.1에 걸쳐 있는 것으로 나타났고, 0°C에서는 AP, S, LC, LS 순으로 0.31부터 0.26사이로 상온인 20°C에서는 AP, S가 0.38, LC가 0.36, LS가 0.32였다. 따라서 -15°C부터 +20°C 사이에 푸아송비의 차이가 가장 큰 것은 S, AP, LC, LS 순이었다. 이렇게 S 혼합물의 푸아송비 차이가 크고 특히 저온에서 급격히 저하하는 것은 SBS 개질 아스팔트의 저온 물리적 경화 (physical harding)가 크게 일어나서 강성 (stiffness)이 크게 증가하기 때문인 것으로 보여진다. 하지만 저온에서의 과다 강성 증가는 취성의 증가를 가져올 우려가 있어 좀더 깊은 연구를 통해 이것의 균열 취약성을 파악해야 할 것이다. 한편 사용된 스트레인 게이지의 특성상 -20°C 이하에서는 푸아송비의 측정이 불가능하였다.

본 연구에서도 PE 계통 재료인 LDPE가 첨가된 개질 아스팔트의 푸아송비 변화가 온도변화에도 둔감하고 저온에서도 푸아송비가 덜 낮아지는 것을 보여주었는데 이는 Lee와 Hesp⁷⁾ 연구와 유사한 결과이다. 그들의 연구에서는 폴리에틸렌 개질 아스팔트의 파괴인성 향상이 월등히 우수함을 보여주었는데 이는 저온 취성의 감소 효과를 통해 이루어졌다고 설명하였다.

Fig. 7~ Fig. 10은 푸아송비의 측정값과 Table 8

Table 8. Regression analysis and predicted values of Poisson's ratio for 4 asphalt mixtures at various temperatures

Mixture	Regression formula	Temperature (°C)							r ²
		-15	-10	-5	0	+5	+10	+20	
AP	$\nu = -0.0002T^2 + 0.0077T + 0.3067$	0.15	0.21	0.26	0.31	0.34	0.36	0.38	0.96
LC	$\nu = -0.0001T^2 + 0.0069T + 0.2655$	0.14	0.19	0.23	0.27	0.30	0.33	0.36	0.86
LS	$\nu = -0.0001T^2 + 0.0051T + 0.2624$	0.16	0.20	0.23	0.26	0.29	0.30	0.32	0.87
S	$\nu = -0.0002T^2 + 0.009T + 0.2751$	0.10	0.21	0.26	0.28	0.32	0.35	0.38	0.86

ν : Poisson's ratio, T : temperature(°C)

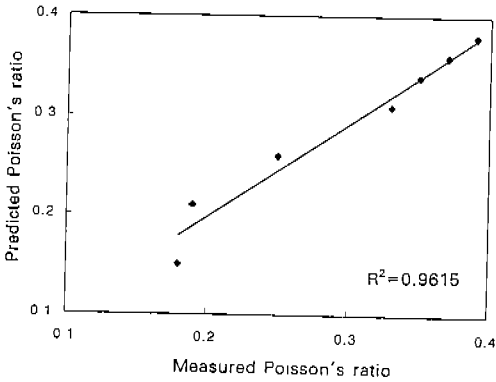


Fig. 7. Correlation between measured ν and calculated ν with temperature (AP mixture)

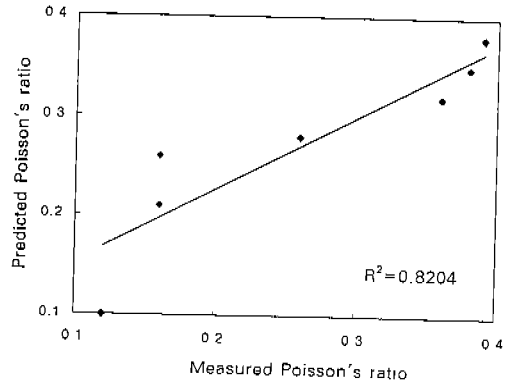


Fig. 10. Correlation between measured ν and predicted ν with temperature (S mixture)

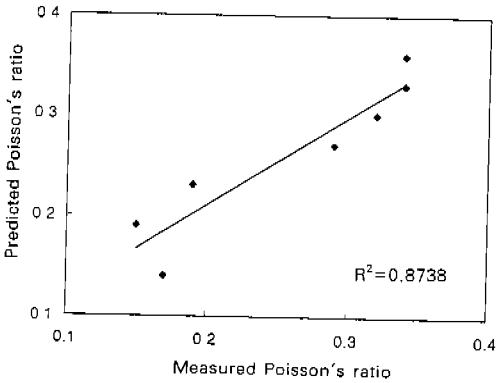


Fig. 8. Correlation between measured ν and predicted ν with temperature (LC mixture)

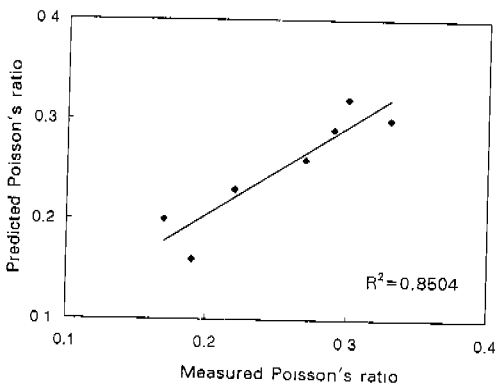


Fig. 9. Correlation between measured ν and predicted ν with temperature (LS mixture)

의 추정식을 이용한 추정값 사이의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 모든 혼합물의 측정치와 예측치의 관계를 보이는 결정계수 (r^2)가 0.82 이상으로 나타나 추정식이 상당히 정확함을 알 수 있었다.

IV. 결 론

아스팔트 콘크리트의 푸아송비는 온도에 따라 변화하므로 아스팔트 포장의 역학적 특성을 분석에서 푸아송비에 대한 더욱 실질적인 값의 적용이 필요하다. 따라서 본 논문은 폴리머 개질 아스팔트 혼합물의 온도 변화에 따른 푸아송비의 변화에 관한 연구를 수행하였다. LDPE와 SBS 폴리머별로 개질 아스팔트 혼합물을 제조하여 일축반복압축모드 하에서 푸아송비를 측정하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 폴리머 개질 아스팔트 콘크리트의 저온 및 상온에서의 푸아송비의 변화를 측정하고 그 변화 폭이 일반 아스팔트 콘크리트보다 큰 것도 있고 작은 것도 있어 폴리머 종류에 따라 차이가 있음을 알 수 있었다.

2. 회귀분석 식에 의한 푸아송비 추정치 변화에서 일반 아스팔트 혼합물과 S 개질 아스팔트 혼합물이 저온에서 다소 높은 값을 나타냈고 상온에서도 가장 높은 값을 보여 LC나 LS 개질 아스팔트

혼합물에 비해 온도에 더 민감함을 알 수 있었다.

3. 개질 혼합물중에서 LS 혼합물이 저온과 상온에서의 푸아송비 차이가 가장 적어 온도에 가장 둔감하였고 S 혼합물은 그 차이가 가장 커 온도에 민감하였다. 특히 S 혼합물은 저온에서 푸아송비가 가장 낮아 취성이 증가되는 것으로 사료된다.

4. 따라서 저온에서 푸아송비 특성의 개선을 위해서는 적절한 폴리머를 사용하여야 하고 이는 저온에서의 특성 뿐만 아니라 상온에서의 푸아송비를 낮추어 변형에 저항성을 커지게 함을 알 수 있었다.

5. 본 연구는 결합재(AP-3)와 골재(편마암)에 대해 각각 한가지 종류로 수행되었는데 일반화된 개질 아스팔트 혼합물의 푸아송비를 얻기 위해서는 보다 다양한 재료를 사용하고 온도 범위도 더 확장한 포괄적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 김광우, 1996, 폴리머 개질 아스팔트 포장재료의 특성, 아스팔트 포장공학의 첨단기술 심포지엄논문집, 석재복합 신소재제품 연구센터, 강원대학교.
2. 김광우, 이명호, 안경애, 최영규, 1996, 개질 아스팔트의 특성연구, 연구 보고서 제1집, 석재복합 신소재 제품연구센터, 강원대학교.
3. 김광우, 조희원, 이상범, 이지용, 안경애, 1997, 폴리머(LDPE, SBS) 개질 아스팔트 혼합물의 특성연구, 아스팔트 포장공학의 첨단기술 국제 심포지엄논문집, 석재복합 신소재제품 연구센터, 강원대학교.
4. 한국도로교통협회, 1996, 건설교통부제정 도로공사 표준시방서공사.
5. ASTM D 4123, 1995, Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures, Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.03, pp. 500-502.
6. Yodar, E. J., and Witczak, M. W., 1975, Principles of Pavement Design, 2nd edition.
7. Lee, N. K. and Hesp, S. A., 1994, Low temperature Fracture toughness of polyethylene-modified asphalt binders, Paper No. 940185, 73rd Annual Meeting, TRB, Washington, D. C.